УДК 699.86:692.2

А. В. Василинич
Ю. С. Бікс

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗОВНІШНІХ СТІН ЗА КРИТЕРІЄМ СУКУПНОЇ ЕНЕРГІЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто підхід до вибору зовнішніх огороджувальних конструкцій за поєднанням теплотехнічних характеристик, втіленої та експлуатаційної енергії. Для умов м. Вінниці досліджено 76 варіантів п'яти типів стін із використанням динамічного енергетичного моделювання OpenStudio/EnergyPlus та параметричного інструмента jEPlus. За нормативним критерієм теплопередачі відібрано 50 допустимих рішень, серед яких сформовано 14 Парето-оптимальних варіантів. Визначено конструкції з найменшою втіленою енергією та найменшою експлуатаційною складовою, а також обґрунтовано рекомендоване рішення на основі Porotherm і мінераловатного утеплювача.

Ключові слова: зовнішня стіна, втілена енергія, експлуатаційна енергія, енергоефективність, OpenStudio, EnergyPlus, jEPlus, множина Парето.

Abstract

The study considers the selection of external wall assemblies by combining thermal performance, embodied energy and operational energy. Under the climate conditions of Vinnytsia, 76 alternatives representing five wall types were assessed using dynamic energy modelling in OpenStudio/EnergyPlus and parametric analysis in jEPlus. Fifty alternatives met the thermal transmittance criterion, and 14 of them formed the Pareto-optimal set. The results distinguish solutions with low embodied energy from those with lower operational energy and support a practical wall solution based on Porotherm blocks and mineral wool insulation.

Keywords: external wall, embodied energy, operational energy, energy efficiency, Pareto optimization.

Вступ

Зовнішні стіни впливають як на тепловий баланс будівлі, так і на ресурсоємність її зведення. Традиційне проєктування переважно орієнтується на досягнення нормативного опору теплопередачі, однак збільшення товщини конструкції або утеплювача може супроводжуватися зростанням енергії, витраченої на виробництво матеріалів. Тому для обґрунтованого вибору доцільно одночасно враховувати початкові енергетичні витрати та енергію, необхідну для підтримання нормативного мікроклімату протягом експлуатації.

Метою дослідження є визначення раціональних конструкцій зовнішніх стін шляхом багатокритеріального порівняння втіленої та експлуатаційної енергії за обов'язкового виконання теплотехнічних вимог для I температурної зони України.

Методика дослідження

Об'єктом дослідження є багатошарові зовнішні огороджувальні конструкції житлової будівлі. Предметом — залежність енергетичних показників стіни від виду основного матеріалу, товщини кладки та мінераловатного утеплювача. Розрахунки виконано для кліматичних умов м. Вінниці та в перерахунку на 1 м² стіни. Для порівняння життєвого циклу прийнято період T = 100 років.

У роботі розглянуто п'ять конструктивних груп: стіни з газоблочною кладкою та утепленням, костробетонні стіни, CLT-панелі, керамічні блоки Porotherm з утепленням і керамзитобетонні стіни з утепленням (див. таблицю 1). Для матеріалів задано густину, теплопровідність, товщину шарів та показники втіленої енергії. Утеплення багатошарових конструкцій стін виконано мінеральною ватою.

Таблиця 1 – Основні типи конструкцій, включені до параметричного дослідження

№	Конструкція	Загальна товщина, мм	R, м²·К/Вт	U, Вт/(м²·К)	Eemb, МДж/м²	U ≤ 0,25
01	Цегла газоблок 300 мм + утеплювач 150 мм	450	4,65	0,215	1734	так
02	Костробетон 400 мм	400	5,80	0,172	280	так
03	CLT 160 мм	160	1,50	0,665	263,2	ні
04	Паротерм 250 мм + утеплювач 150 мм	400	5,03	0,199	535,9	так
05	Керамзитобетон 300 мм + утеплювач 200 мм	500	6,43	0,155	812	так

Енергетичну оцінку сформовано з двох параметрів E_{emb} — втілена енергія матеріалів конструкції на врахованих виробничих стадіях, МДж/м², а також E_{oper} — експлуатаційна енергія за період *T*, МДж/м². У межах прийнятої методики не враховувалися стадії транспортування, монтажу, ремонтів, демонтажу та утилізації.

Теплотехнічне обмеження задавалося умовою *U-value* ≤ 0,25 Вт/(м²·К), що відповідає опору теплопередачі $R_{q,min}$ = 4,0 м²·К/Вт для I температурної зони згідно з ДБН В.2.6-31:2021 [1]. Експлуатаційне енергоспоживання визначалося методом динамічного моделювання з погодинним урахуванням кліматичних даних, теплових надходжень і режимів використання приміщення. На рисунку 1 наведено блок-схему дослідження.



Рисунок 1 – Блок-схема дослідження

Геометричну й конструктивну модель побудовано в OpenStudio [2], а чисельний розрахунок енергетичних балансів виконано обчислювальним ядром EnergyPlus [3]. Для автоматизованого параметричого перебору комбінацій товщини шарів застосовано jEPlus [4]. Результати симуляцій об'єднано в масив даних та опрацьовано в Microsoft Excel. До множини Парето віднесено ті допустимі рішення, для яких не існує іншого варіанта з одночасно меншими або рівними E_{emb} та E_{oper} і хоча б одним строго меншим показником.

Результати дослідження та їх аналіз

За результатами параметричного експерименту сформовано 76 комбінацій конструкцій. Після перевірки теплотехнічного обмеження до подальшого порівняння включено 50 варіантів. Із них 14 рішень утворили множину Парето-фронту: 8 конструкцій Porotherm з мінераловатним утеплювачем і 6 костробетонних стін. Інші 36 нормативно допустимих рішень виявилися домінованими за двома енергетичними критеріями.

Множина Парето-фронту має два характерні сегменти. Костробетонні рішення забезпечують найменшу втілену енергію — від 210 до 385 МДж/м², однак супроводжуються вищою експлуатаційною складовою. Варіанти Porotherm з утеплювачем мають вищі значення Eemb, але характеризуються нижчим E_{oper} за 100 років. Це демонструє компроміс між енергоємністю виробництва матеріалів і подальшими витратами енергії на експлуатацію (див. рисунок 2).

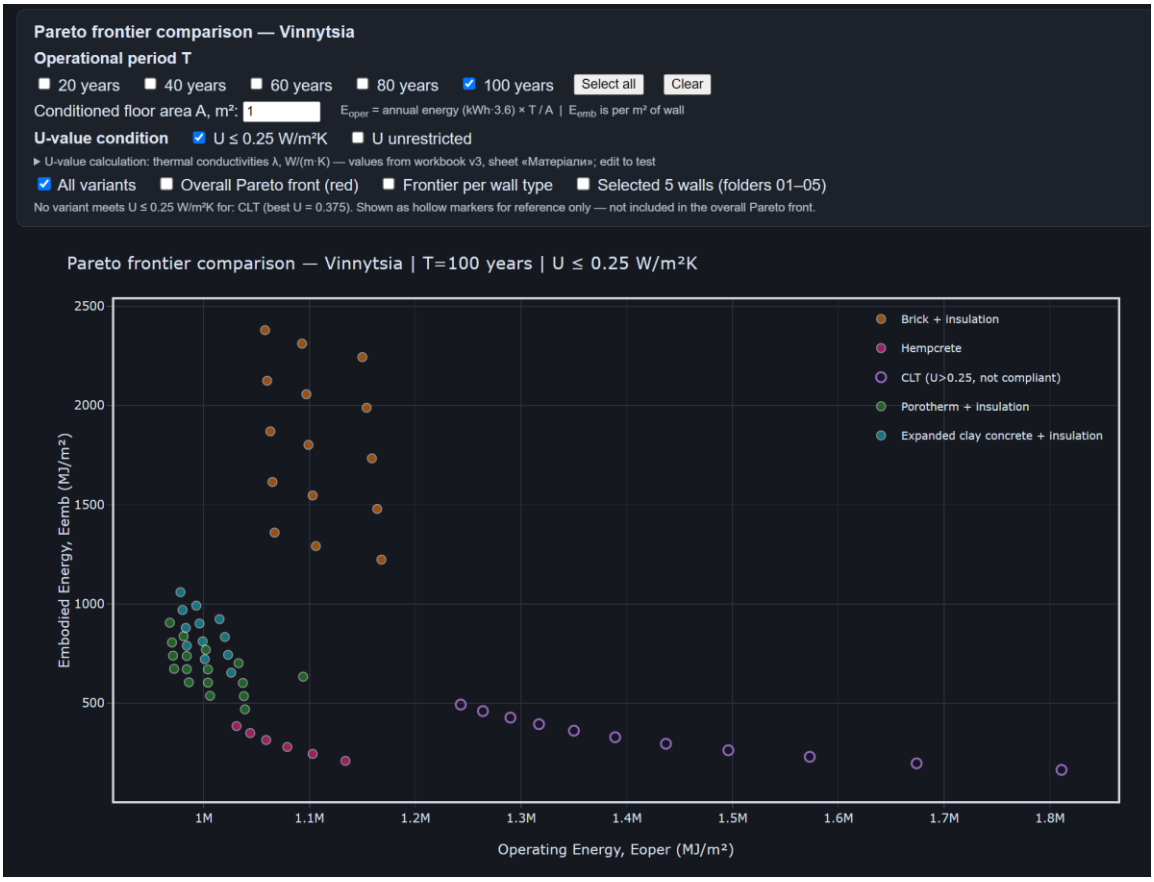


Рисунок 2 – Фронт Парето за критеріями E_{emb} та E_{oper} (T = 100 років)

Найнижче значення втіленої енергії серед Парето-рішень отримано для костробетону товщиною 300 мм — 210 МДж/м². Водночас найменше значення експлуатаційної енергії за 100 років має конструкція Porotherm 200 мм + утеплювач 300 мм: E_{oper} = 968 004 МДж/м². Для кожного типу стіни було знайдено варіант з мінімальним значенням E_{tot} за 100 років серед тих, що виконують вимогу теплотехнічне обмеження по кліматичній зоні [1]. Для CLT, де таких варіантів немає, наведено найкращий із наявних. Результати подано в таблиці 2

Таблиця 2 – Найкращі варіанти кожного типу стіни за критерієм E_{tot} (T = 100 років, A = 1 м²)

Тип стіни	**Варіант**	**U, Вт/(м²·К)**	**R, м²·К/Вт**	**E_{emb}, МДж/м²**	**E_{oper},100, МДж/м²**	**E_{tot}, МДж/м²**
Porotherm + утеплювач	200+300мм	0,105	9,49	905,9	968 004	968 910
Керамзитобетон + утеплювач	400+250мм	0,124	8,07	1060	978 012	979 072
Костробетон	550 мм	0,126	7,92	385	1 031 004	1 031 389
Цегла газоблок+ утеплювач	400+250мм	0,133	7,50	2380	1 058 004	1 060 384
CLT	300 мм	0,375	2,67	493,5	1 243 008	1 243 502

Найменшу загальну енергію має конструкція з керамічних блоків Porotherm 200 мм та утеплювача 300 мм – 968 910 МДж/м². Порівюватимемо цей варіант з базовою стіною з газоблоків 300 мм та утеплювача 100 мм. Porotherm 200 мм з мінераловатним утеплювачем 300 мм, за данними

дослідження зменшує сумарну енергію за 100 років приблизно на 23 %, втілену енергію — на 60 %, а орієнтовну вартість зведення — на 18 % відносно базової конструкції (див. таблиця 3). Вибір базового варіанту газоблок 300 мм + мінвата 100 мм для порівняння зумовлений тим, що це компонування є найбільш поширеним і масово реалізовуваним рішенням у сучасному новому будівництві заданої кліматичної зони, а тому слугує репрезентативною точкою відліку для оцінки реального потенціалу енергозбереження запропонованої оптимізованої альтернативи.

Таблиця 3 – Порівняння основних показників рекомендованої та базової конструкцій

Показник	**Porotherm 200 + мінвата 300 мм**	**Базова конструкція стіни: газобетон 300 + мінвата 100 мм**
U, Вт/(м²·К)	0,112	0,303
Eemb, МДж/м²	674	1 666
Eoper за рік, МДж/м²	9 720	12 660
Σ енергія за 100 років, МДж/м²	972 674	1 267 678
Вартість зведення, грн/м²	4 291	5 212
Вартість зведення, грн/м.п.	12 873	15 635

Отримані результати підтверджують доцільність оцінювання стін не лише за опором теплопередачі, а й за сукупністю енергетичних показників.

Висновки

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано доцільність комплексного оцінювання зовнішніх огороджувальних конструкцій за сукупністю теплотехнічних та енергетичних показників. Запропонований підхід передбачає поєднання нормативного відбору конструктивних рішень із багатокритеріальною оптимізацією за показниками втіленої та експлуатаційної енергії, що дає змогу враховувати не лише початкові витрати енергетичних ресурсів на виробництво матеріалів, а й подальше енергоспоживання будівлі протягом її експлуатації.

Багатокритеріальний аналіз дав змогу сформувати множину Парето-оптимальних конструкцій. Встановлено, що конструкції з керамічних блоків Porotherm та мінераловатної теплоізоляції забезпечують найнижчі витрати сумарної енергії. За результатами порівняльного аналізу як раціональне конструктивне рішення визначено зовнішню стіну з керамічних блоків Porotherm товщиною 200 мм і мінераловатним утеплювачем товщиною 300 мм. Порівняно з базовою конструкцією з газобетонних блоків товщиною 300 мм та мінераловатної теплоізоляції товщиною 100 мм, запропонований варіант характеризується зменшенням сумарних енергетичних витрат за прийнятий 100-річний період приблизно на 23 %, втіленої енергії — на 60 %, а орієнтовної вартості зведення — на 18 %.

Отримані результати свідчать, що вибір зовнішніх огороджувальних конструкцій виключно за критерієм опору теплопередачі не забезпечує повної оцінки їх енергетичної ефективності. Застосування динамічного енергетичного моделювання та багатокритеріальної оптимізації створює передумови для обґрунтованого вибору конструктивних рішень із урахуванням енергетичних і економічних характеристик. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання запропонованої методики під час проєктування енергоефективних будівель та вибору матеріалів зовнішніх стін.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.6-31:2021 "Теплова ізоляція та енергоефективність будівель" №ДБН В.2.6-31:2021. Портал Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996 (дата звернення: 17.11.2026).

2. OpenStudio. Open-source software for building energy modeling. National Laboratory of the Rockies. URL: https://openstudio.net/ (дата звернення: 17.11.2026).
3. EnergyPlus Version 24.2 Documents. Big Ladder Software. URL: https://bigladdersoftware.com/epx/docs/24-2/ (date of access: 17.11.2026).
4. jEPlus - Параметрика для E+. JEPlus. URL: https://www.jeplus.org/wiki/doku.php (date of access: 17.11.2026).

Vasylynych Anastasiia V. – student of group B-25m, Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vasilinichnastya@gmail.com

Бікс Юрій Семенович - к. т. н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Василинич Анастасія Володимирівна – студентка групи Б-25м, Факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vasilinichnastya@gmail.com

Biks Yury Semenovich - PhD, Associate Professor of the Department of Construction, Urban economy and architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.